

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Estudio, análisis, fabricación y test de antenas y circuitos de microondas y milimétricas mediante impresora 3D.



Grado en Ingeniería
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Autor: Itziar Uzqueda Esteban

Director: Jorge Teniente Vallinas

Pamplona, 29 de Junio de 2015





Agradecimientos a...

*La empresa Anteral S.L por la oportunidad
brindada para llevar a cabo este trabajo.*



Abstract

The following research offers the viability study of manufacturing microwave, millimeter wave and submillimeter wave devices using 3D printing. For this purpose, a method of manufacturing which covers the process from the printing of the component to the metalization of its surface and testing is proposed. The reason for this kind of research resides in the rapid development of additive fabrication technologies in the last years, in addition to the impact of the manufacture saving's estimate for the companies. The analysis of results has been carried out with an Agilent Technologies PNA-X N5242A network analyzer. Also, the component design parameters have been analyzed in order to obtain a correct printing. The final conclusions of this research are not reliable indications of viability, due to a working problem suffered by the printer during the development of the project. In any case, it seems that viability of manufacturing prototypes with these additive techniques will be posible in a near future.

Resumen

El presente trabajo de investigación ofrece el estudio de la viabilidad de fabricar componentes de microondas, milimétricas y submilimétricas mediante impresora 3D. Para ello se propone un método de fabricación que abarca desde la propia impresión del componente hasta su posterior metalizado y medida. El motivo de todo ello reside en el auge que las tecnologías de fabricación aditiva han sufrido en los últimos años junto con la previsión de ahorro de fabricación que supondría para las empresas. El análisis de los resultados se ha llevado a cabo con el analizador de redes de Agilent Technologies 'PNA-X N5242A'. También se han analizado los parámetros de diseño de los componentes para su correcta impresión. Los resultados del trabajo no son indicadores fiables de dicha viabilidad debido al problema de funcionamiento que ha sufrido la impresora durante el transcurso del proyecto. En cualquier caso parece que la viabilidad de fabricación de prototipos con dichas técnicas aditivas será posible en un futuro cercano.



Palabras Clave

- 3D printer.
- Millimeter wave.
- Submillimeter wave.
- Microwave.
- Waveguide.



Índice

Abstract.....	2
Resumen.....	2
Palabras Clave	3
Capítulo 1. Introducción.....	6
1.1. Contexto tecnológico.....	6
1.2. Objetivo del Trabajo Fin de Grado.....	6
Capítulo 2. Conceptos generales	8
2.1. Introducción.....	8
2.2. Impresora 3D	8
2.3. Técnicas de impresión 3D	11
2.4. Materiales.....	14
2.5. Técnicas de metalizado.....	15
2.6. Microondas y milimétricas	17
2.7. Bibliografía	17
Capítulo 3. Form1+ SLA	18
3.1. Introducción.....	18
3.2. Características de 'Form1+SLA'	19
3.2.1. Características físicas.....	19
3.2.2. Características de impresión.	19
3.2.3. Materiales utilizados por Form1+SLA.....	20
3.2.4. Componentes de 'Form1+SLA'	22
3.2.5. Funcionamiento de 'Form1+SLA'	24
3.3. Bibliografía	25
Capítulo 4. Procedimiento de fabricación de las piezas	26
4.1. Introducción.....	26



4.2. Etapa de software.....	27
4.3. Etapa de impresión.....	30
4.4. Etapa de post-impresión.....	31
4.5. Sputtering	33
4.6. Ensamblaje.....	34
4.7. Bibliografía.....	35
Capítulo 5. Piezas fabricadas.....	36
5.1. Introducción.....	36
5.2. Piezas	37
5.2.1. WR-10 Waveguide Single	37
5.2.2. Figuras para medida de ϵ relativo de la resina	38
5.2.3. WR-10 Waveguide Split	40
5.2.4. Fishnet Lens Horn Antenna	42
5.2.5. Tilted Angle Bull's Eye.....	43
5.2.6. Lentes	44
5.2.7. Diseños no impresos.....	44
5.3. Problemas de la impresora y posibles soluciones	46
5.3.7. Pruebas de diagnóstico	47
5.3.8. Problema y solución	49
5.4. Bibliografía.....	50
Capítulo 6. Resultados de medidas y análisis	51
6.1. Introducción.....	51
6.2. Resultados y análisis	51
6.2.1. Lentes	51
6.2.2. WR-10 Waveguide Split.....	53
Capítulo 7. Conclusiones	54
Capítulo 8. Futuro de la impresión en 3D	56
8.1. Bibliografía.....	57
Anexo. Recomendaciones de diseño de Formlabs Inc.	58



Capítulo 1. Introducción

1.1. Contexto tecnológico.

La tecnología de la impresión en 3D ha supuesto una revolución en las industrias y se ha convertido en el fenómeno tecnológico por excelencia de los últimos años. Multitud de sectores implementan ya esta tecnología como técnica de uso cotidiano para sus servicios. Esto ha provocado un desarrollo y un avance y, además, es un indicador de que el mercado de la impresión 3D continuará su expansión.

Es una tecnología que permite una adaptabilidad de los componentes que se fabrican y que brinda la oportunidad a las industrias o al usuario de acondicionar de forma autónoma sus necesidades. Por ejemplo, una empresa que necesita un tornillo especial concreto para una aplicación, puede imprimirlo con las especificaciones de diseño requeridas sin necesidad de encargo. Esto puede suponer un ahorro de recursos y dotar a la empresa de una autonomía que sin dicha técnica no tendría.

En el sector de la Telecomunicación, ámbito en el que se desarrolla la investigación en este proyecto, la fabricación de componentes de microondas y milimétricas supone un coste elevado para las empresas. La fabricación con impresora 3D podría utilizarse para algo más que el prototipado de los componentes, podría realmente fabricar dispositivos que funcionasen y que pudieran implementarse como componente definitivo.

1.2. Objetivo del Trabajo Fin de Grado.

Este Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo principal la colaboración con la empresa Anteral S.L en la investigación sobre la viabilidad en la fabricación de componentes de alta



frecuencia y antenas mediante impresión 3D. Para ello se imprimirán los componentes, se metalizarán, se medirán, se evaluarán las pérdidas y se concluirá si dicha viabilidad de fabricación existe y por tanto, supone el abaratamiento de los costes de fabricación.



Capítulo 2. Conceptos generales

2.1. Introducción

Previamente a describir este Trabajo Fin de Grado, he considerado necesario definir algunos conceptos generales que permiten comprender los distintos aspectos del mismo.

Para ello se detallan en este capítulo los diferentes pilares, en cuanto a maquinaria, técnicas y materiales se refiere, que hacen posible que el trabajo se desarrolle. El capítulo servirá como ayuda al lector para conocer los aspectos básicos sobre los que se fundamenta este trabajo. Se centrará principalmente en las definiciones de impresora 3D, las técnicas de impresión, materiales y la técnica de metalizado utilizada en este proyecto.

2.2. Impresora 3D

Una impresora 3D es una máquina capaz de representar diseños en 3D, obteniendo piezas volumétricas a partir de un diseño realizado con una herramienta software.

El funcionamiento básico de este tipo de impresoras es dividir el diseño '.CAD' en múltiples capas que serán las que se irán imprimiendo hasta conformar el diseño (Figura 2.1). Este tipo de funcionamiento es lo que se define como técnica aditiva de impresión.

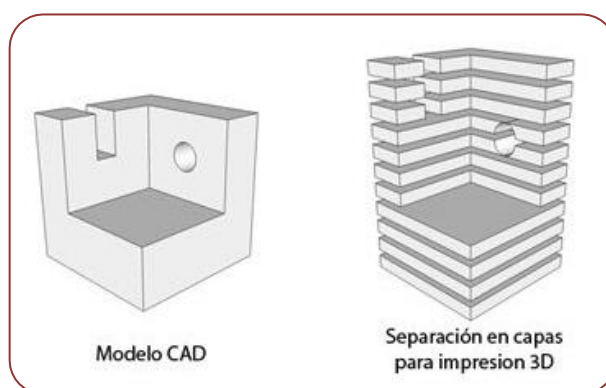


Figura 2.1. Funcionamiento básico de impresora 3D.

En función del material utilizado y de la técnica empleada para la impresión, se puede establecer una primera clasificación (ver Tabla 2.1).

Tipos	Tecnología	Material
Extrusión	Modelado por deposición fundida	Termoplásticos, HDPE, metales eutécticos, materiales comestibles
Hilado	Fabricación por haz de electrones	Casi cualquier aleación
Granulado	Sinterizado ¹ directo de metal por láser	Casi cualquier aleación
	Fusión por haz de electrones	Aleaciones de titanio
	Sinterizado selectivo por láser	Polvo termoplástico
	Sinterizado selectivo por calor	Termoplásticos, polvos metálicos, polvos cerámicos
	Proyección aglutinante	Yeso

¹ Sinterizado: tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas.



Laminado	Laminado de capas	Papel, papel de aluminio, capa de plástico
Fotoquímicos	Estereolitografía	Fotopolímero
	Fotopolimerización por luz ultravioleta	Fotopolímero

Tabla 2.1. Clasificación de impresoras 3D según tecnología y material.

Algunas de estas técnicas y materiales se explican de forma más detallada en el apartado 2.3 y 2.4 de este capítulo. Se hará especial hincapié en aquellas que son más utilizadas en la actualidad.

Además se hará una segunda clasificación en función del ámbito de uso y funcionalidad de la misma:

- **Impresoras caseras:** uso doméstico. Funciona depositando el material que está en forma líquida desde el cabezal de impresión. Su precio oscila entre 300€ y 5.000€ . Normalmente son de extrusión, como es el caso de la impresora BQ que se halla en el laboratorio de THz de Anteral S.L.
- **Impresoras profesionales:** son aquellas diseñadas para prestar servicios a empresas que necesitan prototipado o diseño de forma rápida. Sus precios pueden variar entre 5.000€ y 80.000€. Éstas admiten un rango más amplio de técnicas de impresión.
- **Impresoras industriales o de producción:** cubren una gama de aplicaciones amplia (aeroespacial, automoción, medicina, odontología...). Su coste es el más elevado (100.000€). Permite gran variedad de materiales (plástico, metal, cera o arena).

2.3. Técnicas de impresión 3D

En este apartado se definen cada una de las técnicas de impresión más relevantes en la actualidad.

La versatilidad que proporciona esta tecnología permite adaptar la impresión en 3D a múltiples disciplinas, debido a que el resultado de las impresiones será diferente utilizando una u otra técnica.

En el modelado tradicional, el punto de partida es un bloque al cual se le van extrayendo capas hasta formar la pieza. Sin embargo, en el modelado 3D se utiliza una técnica de adición de capas en la cual se parte de cero y se va construyendo capa por capa hasta conseguir el modelo definitivo.

Las principales técnicas desarrolladas en la actualidad se clasifican en:

- **FDM:** modelado por deposición fundida o Fused Deposition Modeling (FDM). Se trata de una técnica de impresión aditiva, es decir, depositando el material capa por capa para generar la pieza deseada. Se introduce un filamento de plástico o metálico en una boquilla móvil manejada por tres motores normalmente (Ver Figura 2.2). La principal desventaja de este tipo de impresiones es la baja resolución que presentan, pero como ventaja pueden destacarse su bajo coste y la sencillez de uso.

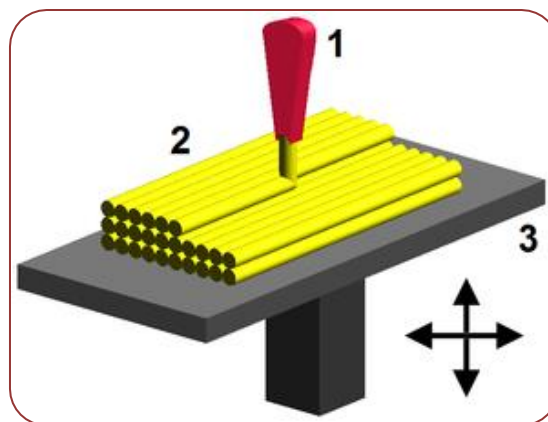


Figura 2.2. Esquema de FDM.

• **Estereolitografía:** fue la primera en desarrollarse. Un haz de luz ultravioleta proveniente de un láser incide sobre un material líquido fotosensible, solidificándolo y generando capa por capa la pieza impresa (ver Figura 2.3). Cuando se completa una capa, la plataforma móvil sobre la que se colocan las capas sólidas se baja o sube (dependiendo de la impresora) una distancia que es igual al espesor de cada capa. Su principal ventaja es su rapidez de impresión.

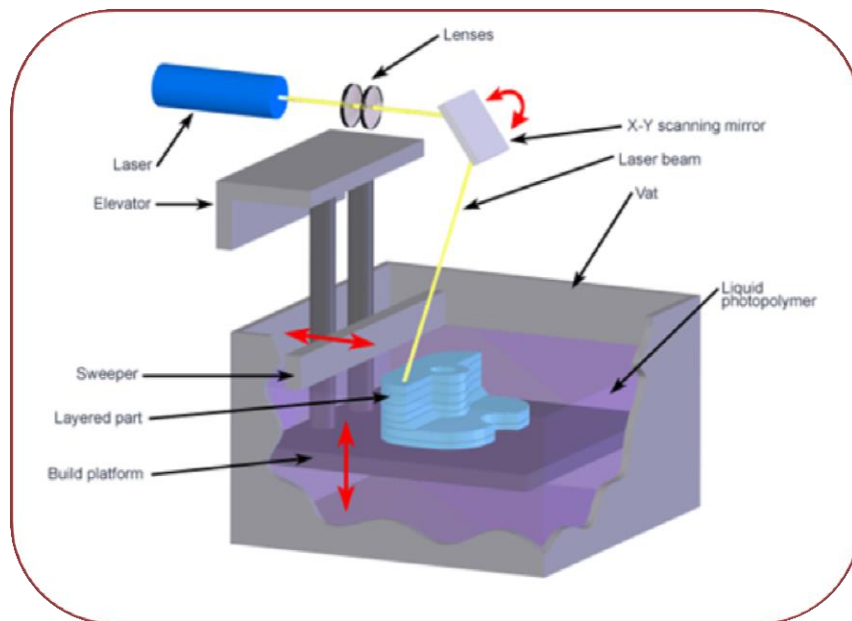


Figura 2.3. Proceso de impresión con estereolitografía.

• **Impresión por láser o SLS (Selective Laser Sintering):** se trata de un proceso basado en la fabricación de productos usando materiales en forma de polvo. Las impresoras que utilizan esta técnica tienen un brazo deslizante que distribuye el polvo en la plataforma de impresión. El láser es dirigido a la sustancia en polvo en puntos específicos y los calienta (casi hasta alcanzar el punto de ebullición), une las partículas, solidificando el material. Cuando se imprime una capa la plataforma asciende o desciende una distancia que es igual al espesor de la capa. Una vez la pieza se ha impreso, se deja enfriar.

- **Direct Metal Printing (DMP):** también conocida como DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Mediante un láser se endurece el polvo metálico, produciendo una pieza metálica directamente (ver Figura 2.4). Se realiza del mismo modo que la técnica SLS.

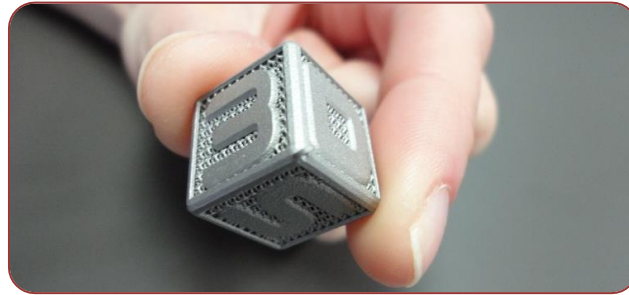


Figura 2.4. Modelo impreso con DMP.

- **Polyjet:** funciona similar a la estereolitografía en el sentido de basarse en la solidificación de un polímero mediante la aplicación de un láser UV. En este caso, la diferencia reside en que Polyjet utiliza dos cabezales de impresión, uno encargado de la dispensación del fotopolímero líquido y el otro encargado de la activación del láser. No necesitan de un tanque de resina como en la estereolitografía y por tanto se pueden asemejar a la idea de impresora de inyección de tinta.

- **Fusión por haz de electrones:** un haz de electrones de 3000 Vatios calienta la sustancia en coordenadas específicas, calientan el polvo y fusionan las partículas generando una sustancia en estado sólido.

- **3DP:** como en el caso de SLS, consiste en la distribución de plástico en polvo en una plataforma de impresión. El cabezal inyecta un agente que provoca la unión de las partículas entre sí y por tanto la solidificación de la pieza. Cuando se obtiene la pieza completa se calienta para completar la solidificación.

Todos los procesos de fabricación aditiva coinciden en el hecho de que pueden obtenerse geometrías muy complejas de forma eficiente, es decir, sin invertir mucho tiempo en su



construcción. En todos los casos, es imperceptible la estructura de capas por ser éstas muy finas.

2.4. Materiales

Los materiales utilizados por las impresoras 3D actuales se clasifican en tres grandes grupos, que son:

- **Plástico** (ABS, PLA, resina, poliamida y plástico transparente).
- **Metal** (acero, aluminio, titanio, cobalto).
- **Otros** (cerámica, madera, arena, cristal, cera).

A continuación se describen los cinco tipos principales de materiales clasificados dentro del grupo de los plásticos.

- El termoplástico ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) se utiliza sobretodo en impresoras 3D caseras. Es un material de superficie rugosa, de textura y funcionalidad similar al plástico. Se funde aproximadamente a 200°C. La impresión 3D de ABS implica el uso de impresoras de plástico ABS.
- La impresión 3D de PLA se hace con impresoras PLA. El PLA es un poliéster termoplástico creado a partir de recursos renovables, por tanto un material ecológico. Su resistencia es menor que ABS y su temperatura de fundición es 160°C. Presenta gran sensibilidad al agua.
- El uso de material resinoso se utiliza en las tecnologías Polyjet y estereolitografía.
- La impresión de poliamida se utiliza con la técnica de sinterizado por láser. Los objetos resultantes de utilizar este material, son estables y presentan gran resistencia a los golpes. Además, son ligeramente flexibles.



- La impresión con plástico transparente es aplicable a las técnicas de sinterizado por láser, estereolitografía y Polyjet.

Si se evalúan los materiales metálicos utilizados por impresoras 3D actuales, cabe destacar:

- Acero inoxidable: material resistente a la corrosión. Utilizado en industria aeroespacial para el prototipado rápido de objetos resistentes y de gran durabilidad.
- Aluminio: es un material altamente resistente y posee propiedades favorables adicionales que hacen que sea una opción óptima para la fabricación de objetos sometidos a altas cargas. Además las piezas impresas con este material presentan poco peso.
- Titanio: material resistente y de poco peso. Se utiliza en el campo de la medicina (prótesis), en aeronáutica y automoción. Además es un material que garantiza niveles bajos de impurezas.
- Aleación cobalto-cromo: material con gran resistencia al calor y al desgaste, lo cual hace que sea un material ideal para la ingeniería de alta temperatura.

2.5. Técnicas de metalizado

La técnica del metalizado hace referencia al proceso de revestimiento de un metal sobre la superficie de un objeto.

Existen diferentes tecnologías de metalización de objetos como:

- **Deposición electrolítica**: mediante una corriente eléctrica se va depositando el material.
- **Deposición química**: una reacción química reduce el metal y éste se deposita en la superficie.

- **Metalización al vacío:** consiste en evaporar un metal, como el aluminio, en una cámara de vacío para que se deposite sobre los sustratos.
- **Proyección térmica:** consiste en proyectar pequeñas partículas fundidas, semifundidas, calientes e incluso frías que se unen sucesivamente a una superficie.

El metalizado de las piezas de este proyecto se ha realizado con una máquina de sputtering (ver Figura 2.5).

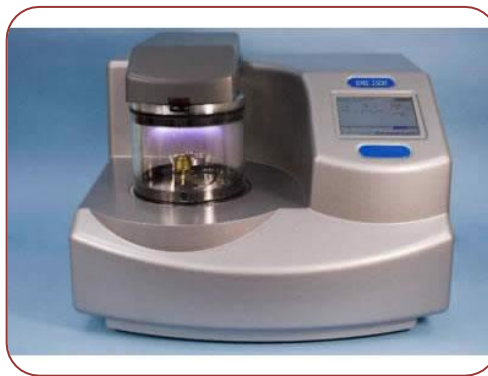


Figura 2.5. Máquina de sputtering.

La pieza a metalizar se introduce en la máquina, y ésta genera el vacío eliminando el gas que contiene. Se genera una diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo y se introduce gas Argón que bajo dicha diferencia de potencial se ioniza. Dichos iones impactan contra el ánodo en el cual se ha colocado un trozo de metal que queremos depositar. Los iones arrancan átomos de metal a depositar que es atraído por el cátodo.

Un inconveniente es que la precipitación se produce de forma perpendicular a la pieza, por lo que será una buena técnica de metalizado para aquellas caras que sean perpendiculares a dicha precipitación, mientras que para las caras longitudinales el metalizado resultará de mucho menos grosor. Este fenómeno puede ser perjudicial para el metalizado de aquellas caras de las guías de onda que se encuentren en dicha posición. Por este motivo la máquina implementa un motor para poder rotar la pieza y conseguir un metalizado más homogéneo y una pieza con otro rotor y variación del ángulo para que durante el proceso se consiga una mejor homogeneización de la deposición. La técnica del sputtering tiene como desventaja que no puede metalizarse con demasiado grosor puesto que el proceso se realiza átomo a átomo y por tanto resulta lento.



2.6. Microondas y milimétricas

En este Trabajo Fin de Grado se va a trabajar con componentes de RF que trabajan en la banda de frecuencias de milimétricas y submilimétricas (tabla 2.2), que comprenden los rangos frecuenciales de 30-300 GHz y de 300 a 3000 GHz respectivamente.

Bandas de frecuencia de milimétricas y submilimétricas									
Banda	Q	U	V	E	W	F	D	G	
Inicio(GHz)	30	40	50	60	75	90	110	140	
Final(GHz)	50	60	75	90	110	140	170	220	500

Tabla 2.2. Tabla de bandas de frecuencias de milimétricas y submilimétricas.

La utilización de frecuencias elevadas da lugar a componentes pequeños, lo cual supone un reto para este trabajo: imprimirlos con la mayor precisión posible para que su funcionamiento sea satisfactorio.

2.7. Bibliografía

1. <http://hexxon.es/materiales-de-impresion-3d-iii-resinas-fotopolimericas/>
2. <http://www.impresoras-3d.info/funcionamiento-y-tipos-de-impresoras-3d/>
3. <http://es.3dilla.com/>
4. <http://www.areatecnologia.com/informatica/impresoras-3d.html>
5. <http://www.xataka.com/perifericos/estas-son-las-tecnologias-de-impresion-3d-que-hay-sobre-la-mesa-y-lo-que-puedes-esperar-de-ellas>
6. <http://www.3dsystems.com/3d-printers/production/overview>
7. <https://es.wikipedia.org/wiki/Metalizaci%C3%B3n>
8. <http://www.telstar-vacuum.com/productos/metalizacion%20al%20vacio.htm?language=es>

Capítulo 3. Form1+ SLA

3.1. Introducción.

La impresora 'Form 1+ SLA' (ver Figura 3.1) ha sido diseñada y fabricada por la empresa Formlabs Inc., con sede en 35 Medford St. Suite 201 35 Somerville, MA 02143 USA.

Se trata de una impresora 3D basada en la utilización de materiales resinosos, principalmente para la fabricación de piezas de índole ingenieril, como son el desarrollo de prototipos y la implementación de dichas piezas en sistemas de ingeniería, aunque también puede extenderse su uso al diseño y a la medicina.

La técnica utilizada por la impresora es la estereolitografía. Dicha técnica hace referencia a una técnica de impresión que se fundamenta en un haz de un láser ultravioleta de 405 nm que incide en una resina sensible a la luz, la cual se solidifica al combinarse con el haz UV.

En este caso, el haz del láser incide en las diferentes coordenadas y va solidificando la resina en cada capa dando lugar a la formación de una pieza. Todo ello debe acompañarse de los correspondientes soportes para la pieza y de la curación posterior a la fabricación con luz ultravioleta una vez que la pieza se ha extraído de la impresora.



Figura 3.1. Impresora Form1+SLA.



3.2. Características de 'Form1+SLA'

En los dos apartados siguientes se mencionan las características físicas y las de impresión que presenta Form1+SLA.

Dentro de las características físicas destaca su ligereza y pequeño tamaño, lo cual hace que sea una máquina manejable.

En cuanto a las características de impresión, cabe destacar la resolución que presenta. En este trabajo será imprescindible el aprovechamiento de dicha propiedad.

3.2.1. Características físicas.

Dimensiones	30cm x 28cm x 45cm
Peso	8 Kg
Temperatura de operación	18-28° C
Alimentación	100-240V/1.5 A(50Hz/60Hz)/60W
Láser	$\lambda = 405 \text{ nm}$

Tabla 3.1. Características físicas/Dimensiones.

3.2.2. Características de impresión.

Tecnología	Estereolitografía (SLA)
Volumen de impresión máximo	125mm x 125mm x 165mm
Tamaño impresión mínimo	300 μm
Grosor de capas	25,50,100,200 μm
Generación de soportes	Auto o manual

Tabla 3.2. Características de impresión.

3.2.3. Materiales utilizados por Form1+SLA

Cada fabricante de impresoras 3D desarrolla sus propias resinas, pero las diferencias son mínimas entre ellas.

Formlabs Inc. desarrolla distintos tipos de resina: la resina standard, la castable y la flexible.

La resina standard es una resina que sirve para aplicaciones muy variadas. Existen tres tipos de resina standard que únicamente se diferencian en su color. Esta resina necesita de una limpieza con alcohol isopropílico (IPA) y de una exposición a luz UV para conseguir su rigidez característica. Existen el tipo CLEAR 02, WHITE, GREY y BLACK. En la tabla 3.3 puede verse esta clasificación.

Tipos de resina Standard		
CLEAR 02		Anteriormente CLEAR 01 (pero con mejora en sus propiedades): se trata de una resina transparente y rígida que posibilita la fabricación de piezas de alta resolución. Ésta es la resina que se ha utilizado para la fabricación de las distintas piezas de este proyecto.
WHITE		Resina de color blanco.

GREY		Resina de color gris.
BLACK		Resina de color negro.

Tabla 3.3. Clasificación de la resina standard de Formlabs Inc.

Otra de las resinas desarrolladas por Formlabs Inc. es la resina “castable”. Se trata de una resina muy resistente que se utiliza para piezas de muy alta resolución. Es un material que una vez impreso, se puede usar para fabricar a partir de él un molde de escayola ya que se puede eliminar en un horno. El molde de escayola se puede usar posteriormente para fabricar piezas por fundición (“casting” en inglés) vertiendo en el interior del molde el material líquido que va a componer la pieza final, normalmente un metal (ver Figura 3.2) .



(a)



(b)

Figura 3.2. (a)Secado de la pieza con el proceso de casting; (b) Resultado del casting de las impresiones.

Por último, la resina flexible (ver Figuras 3.3 y 3.4) es una resina apropiada para piezas que necesitan de cierta elasticidad y que requieran de una cierta capacidad de elongación.



Figura 3.3. Resina FLEXIBLE de Formlabs Inc.



Figura 3.4. Ejemplo de resina FLEXIBLE.

3.2.4. Componentes de 'Form1+SLA'

Los componentes más significativos de la base son los que pueden verse en las figuras 3.5 y 3.6.

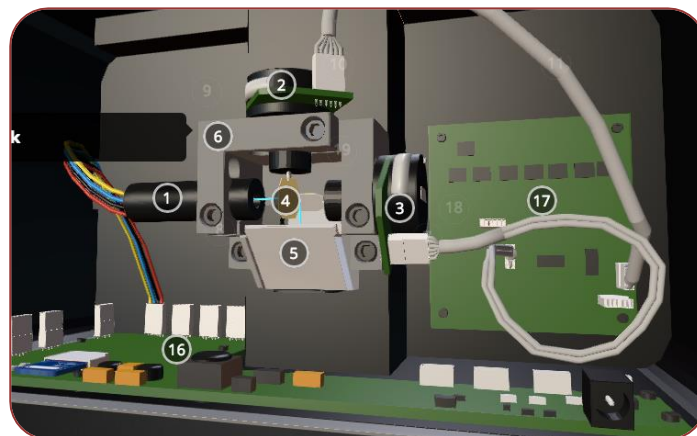


Figura 3.5. Base de Form1+ SLA.

1. Laser.
2. Y Galvo (Galvanómetro del eje Y).
3. X Galvo (Galvanómetro del eje X).
4. Espejo galvánico.
5. Small mirror.
6. Bloque galvánico.
16. Main circuit Board
17. Galvo Driver Board

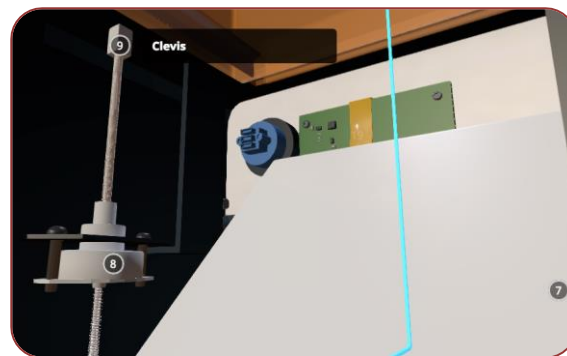


Figura 3.6. 'Base Form1+ SLA'.

7. Large mirror.
8. Peel motor.
9. Clevis ("abrazadera" en inglés).

Sobre la base de la impresora se encuentran el tanque de resina y la build platform, que pueden verse en la figura 3.7.



Figura 3.7. (a) Tanque de resina; (b) Build platform.

3.2.5. Funcionamiento de 'Form1+SLA'.

Para la impresión de las piezas, 'Form1+ SLA' utiliza la técnica de la estereolitografía, como se ha mencionado anteriormente. Para ello, el procedimiento es el que detalla a continuación.

El láser, situado en un lateral de la base de la impresora, emite un haz de luz ultravioleta de longitud de onda 405 nm.

Para alcanzar la base del tanque de resina, utiliza un sistema de reflexión del haz del láser. Dicho haz se encamina hacia la base del tanque mediante la reflexión en tres espejos de pequeñas dimensiones y un último espejo de mayor tamaño. El haz ultravioleta en combinación con la resina, produce una solidificación de la misma en la placa de impresión ("build platform").

Para conseguir que los diferentes haces incidan de forma exacta en la placa de impresión, la impresora utiliza los galvos correspondientes al eje X y al eje Y, que producen una orientación diferente en el espejo galvánico. Esto provoca que las reflexiones posteriores produzcan la solidificación de la resina en la placa de impresión en la coordenada deseada (ver Figura 3.8). Además, en el eje Z existe un motor que irá ascendiendo a medida que se completa cada una de las capas de la pieza.

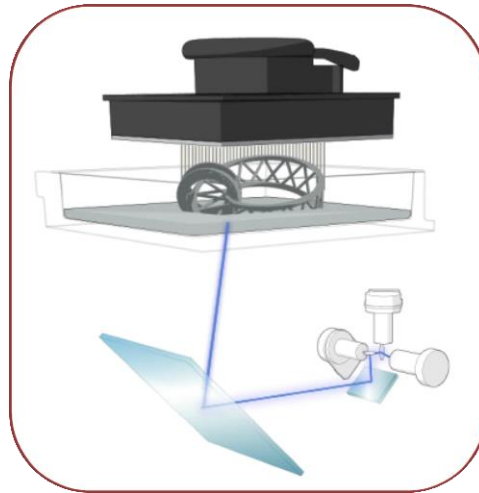


Figura 3.8. Ejemplo de funcionamiento de Form1+ SLA.

3.3. Bibliografía

1. <http://formlabs.com/>
2. <http://formlabs.com/products/materials/standard/>
3. <http://formlabs.com/media/upload/Castable-Tutorialv4.pdf>
4. <http://formlabs.com/company/blog/2015/01/28/interactive-tour-form-1-3d-printer/>

Capítulo 4. Procedimiento de fabricación de las piezas

4.1. Introducción

En este capítulo se describe, a rasgos generales, cuál ha sido el proceso de fabricación de los componentes impresos.

En todos los casos se parte de un diseño en 3D realizado con la herramienta software 'HFSS'. Una vez diseñado, se imprime el modelo con la impresora 'Form1+SLA' mediante el procedimiento explicado en el capítulo 3. Para concluir, se cura la pieza impresa, se somete a un proceso de sputtering y se ensambla la pieza para su posterior medida. El procedimiento de fabricación podría resumirse en la Figura 4.1.

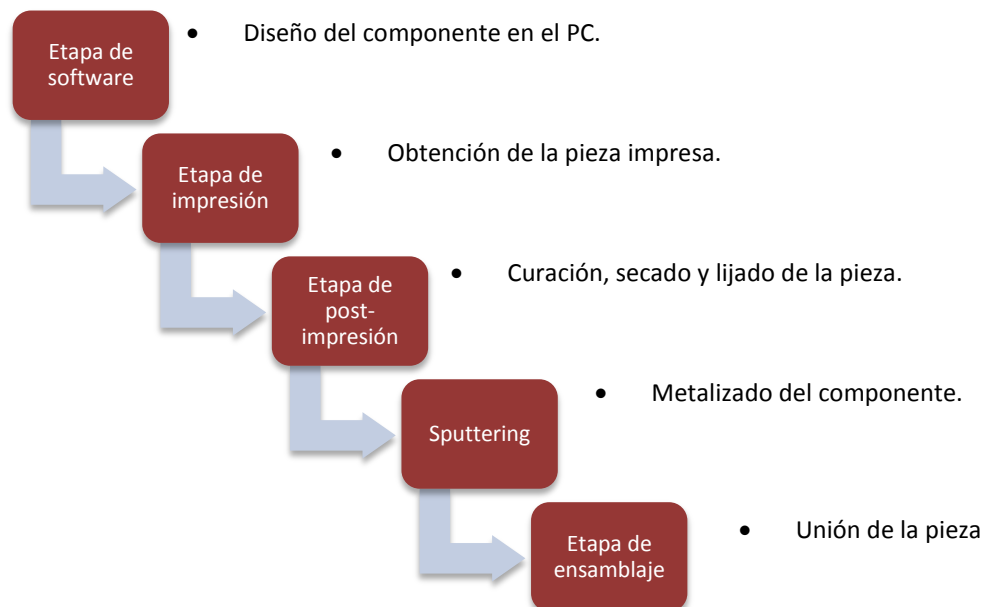


Figura 4.1. Esquema de proceso de fabricación.

4.2. Etapa de software

El programa principal para la impresión de las piezas es PreForm 1.8.2. Es una herramienta software que permite acondicionar un diseño previo en 3D para su impresión con la impresora Form1+ SLA. Dicho acondicionamiento consiste en la inclinación de la pieza, colocación de soportes de sujeción, escala de la pieza...

Previamente a la utilización de este programa, es necesario un diseño en 3D de la pieza, que se hace normalmente mediante la herramienta de software de elementos finitos ANSYS HFSS aunque en algunos casos también se ha usado CST Microwave Studio. Ambos programas son los utilizados habitualmente a nivel mundial para el diseño de antenas y componentes de radiofrecuencia y la simulación de los parámetros más importantes en cada uno de ellos (ver Figura 4.2).

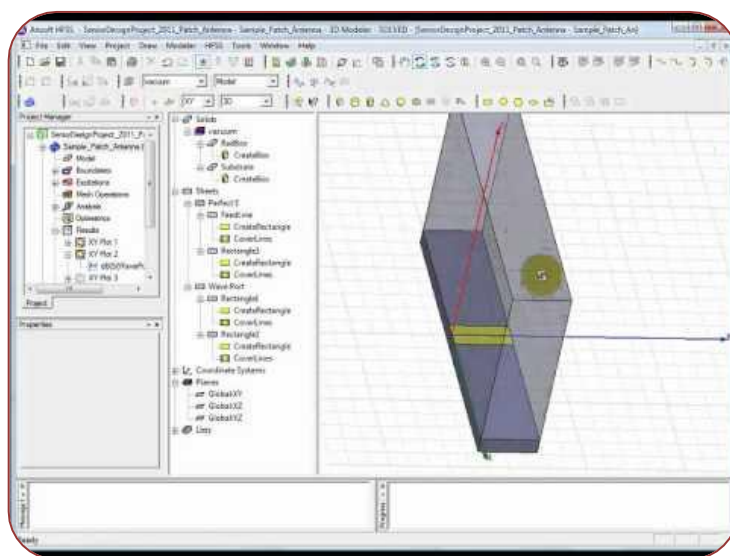


Figura 4.2. Ejemplo de diseño con HFSS.

Ya con el componente dibujado, se exporta el archivo en formato '.step' por lo que se necesita de otro software de traducción de '.step' a '.stl', que es el formato definitivo para utilizar en el software PreForm 1.8.2. Este proceso se ha realizado mediante Autocad 2013. Autocad permite la importación de archivos '.step' y la exportación en '.stl'. Únicamente se ha utilizado dicho programa como medio de traducción de formatos (ver Figura 4.3).

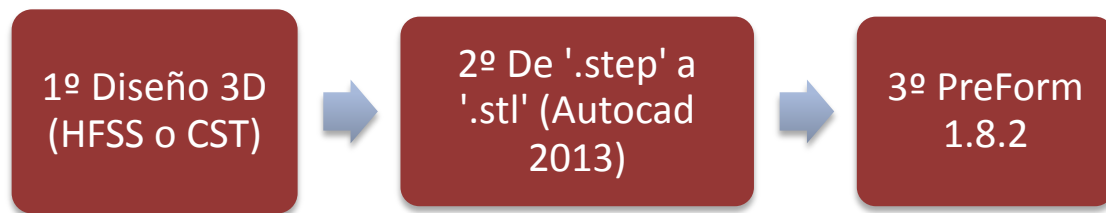


Figura 4.3. Proceso de la etapa de software.

Una vez llevado a cabo este proceso, únicamente se trabaja con el software PreForm 1.8.2. El primero de los pasos que hay que realizar es orientar la pieza con respecto a X, Y y Z (ver figura 4.4). Se recomienda por motivos de fabricación que exista una inclinación de unos 10º con respecto a la horizontal.

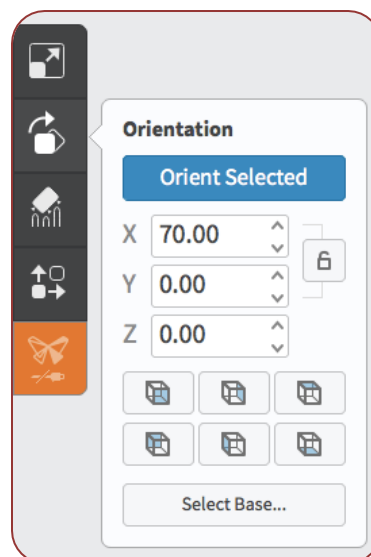


Figura 4.4. Ajustes de orientación de PreForm 1.8.2.

Tras la orientación de la pieza, se colocan los soportes y la base. Se puede seleccionar el grosor de la base, altura de los soportes...(ver figura 4.5).

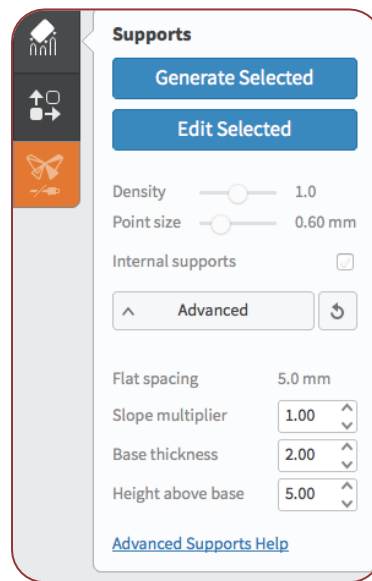


Figura 4.5. Generación de soportes en PreForm 1.8.2.

Cuando definitivamente se ha editado la pieza y se va a imprimir, se guarda el archivo '.form' que será la pieza definitiva (ver figura 4.6).

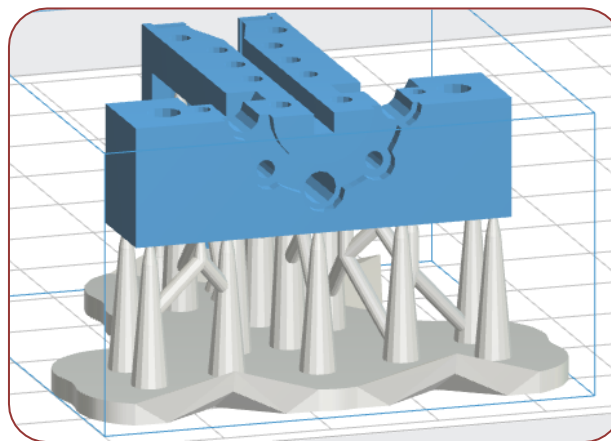


Figura 4.7. Ejemplo de pieza a imprimir.

4.3. Etapa de impresión

Este proceso consiste en la impresión de la pieza en cuestión. Todo este proceso se ha realizado en la sala limpia ISO 7.

Primeramente es importante comprobar que el tanque esté libre de cualquier resto de resina sólida de anteriores impresiones y que el nivel de resina se encuentre entre el nivel máximo y mínimo que permite el tanque. Además, se debe seleccionar el tipo de resina con el que se va a realizar la impresión.

Para comprobar si existen restos, es necesario pasar la espátula por el tanque con mucho cuidado de no rayar la base del tanque (Figura 4.8). Si se detecta algún trozo de resina, se extrae con un peine. Se repite el proceso hasta asegurarse de que el tanque quede libre de todo tipo de partículas extrañas.

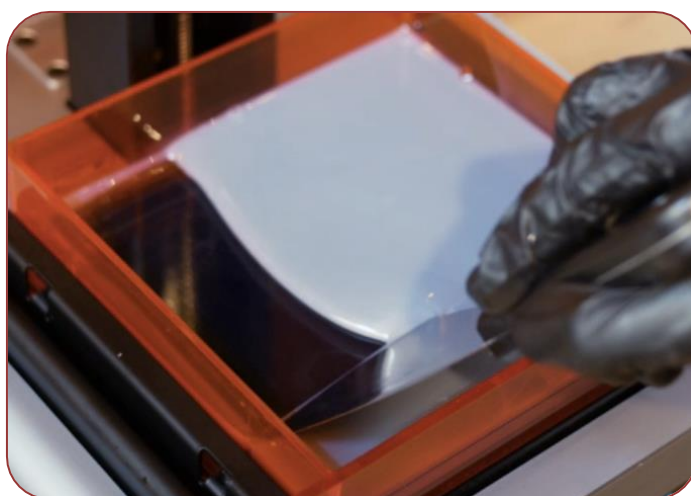


Figura 4.8. Comprobación de restos en el tanque de resina.

Cuando se ha comprobado que el tanque está limpio, mediante el software PreForm 1.8.2 se envía la pieza a la impresora. El software carga el diseño en la impresora y es ésta quien solicita presionar el botón de encendido para confirmar la impresión. Una vez se presiona, la impresora comienza a realizar su impresión. La duración de este proceso depende de la cantidad de resina que necesite la pieza y de la complejidad que presente la misma. El software estima de forma precisa la duración de la impresión.

4.4. Etapa de post-impresión

Cuando la pieza ha terminado de imprimirse, es necesario someterla a un proceso de limpieza para eliminar las posibles impurezas de resina que quedan en ella, especialmente en los agujeros destinados a la inserción de tornillos y tuercas.

Para ello existe un kit de Formlabs que permite realizar dicho proceso (ver Figura 4.9).



Figura 4.9. Form Finish Kit.

Una vez se ha extraído la pieza de la impresora, se rocía con alcohol isopropílico (IPA) para poder despegarla de la plataforma de impresión con la espátula (ver Figura 4.10). El IPA disuelve la fotoresina que no ha sido curada con UV y así la podemos eliminar de la pieza. A continuación se introduce en un tanque de IPA el cual tiene una cesta que permite batir la pieza en alcohol durante unos dos minutos aproximadamente. Después se introduce la pieza en otro tanque de alcohol durante diez minutos como puede verse en la figura 4.11.

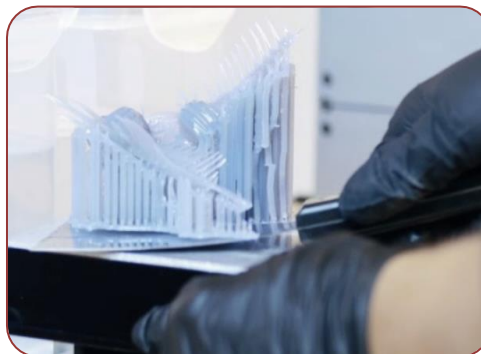


Figura 4.10. Extracción de la pieza de la build platform.



Figura 4.11. Batido de la pieza para limpiar impurezas.

A continuación, ya fuera de la sala limpia, se utiliza una pistola de aire comprimido para poder secar el alcohol y eliminar el resto de virutas de resina que han podido quedar en la pieza.

Por último, para que la pieza se cure es necesaria su exposición a rayos de luz ultravioleta. En un principio, este proceso se hacía exponiendo las piezas a los rayos del sol, pero el tiempo que necesitaban para curarse era de aproximadamente dos días por cada una de las piezas. Por este motivo se construyó una lámpara UV con el fin de obtener un secado más rápido de las mismas (Figura 4.12). Con la utilización de la lámpara las piezas se curaban en 2-3 horas aproximadamente.

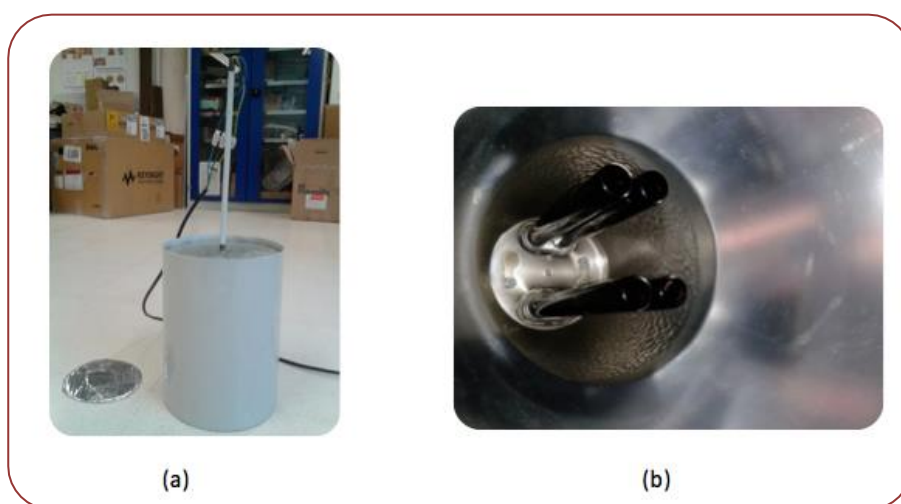


Figura 4.12. (a) Estructura externa de lámpara UV; (b) Bombillas UV e interior de lámpara UV.

Para culminar con el tratamiento de la pieza impresa, se retiran los soportes (Figura 4.13) con una tenaza que también forma parte del kit de Formlabs. En el caso de detectar alguna imperfección una vez curada la pieza, ésta se evalúa y si se puede, se lija para eliminarla.



Figura 4.13. Método de extracción de soportes.

4.5. Sputtering

Tras el proceso de curación y secado de las impresiones, y una vez comprobada la viabilidad de funcionamiento por medio de una inspección visual primero y con el microscopio óptico de medición de que se dispone después, se somete la pieza a un proceso de sputtering con cobre. No en todas las piezas impresas será necesaria la aplicación de esta técnica.

Cuando una parte de la pieza que se imprime se compone de una guía de onda y se imprime en dos mitades, es menor el problema puesto que el reparto del cobre es más uniforme. Sin embargo, cuando se imprimen las piezas en un solo bloque, debido a que la frecuencia de operación de las guías es alta y por tanto, éstas serán de dimensiones pequeñas, la inserción del cobre en la guía es de menor calidad y da lugar a irregularidades en la guía que producen pérdidas extra en la transmisión.

4.6. Ensamblaje

Antes de explicar cómo se realiza el ensamblaje de las piezas es conveniente explicar brevemente la métrica de tornillos y tuercas utilizadas para ello.

Las métricas existentes en Anteral S.L son:

- Métricas europeas: M1.6, M2,M2.5,M3,M4.
- Métricas inglesas: 4-40 UNC-2B.

Para medir las dimensiones reales de cada una de las métricas se utilizó el calibre digital de Mitutoyo. Se midió la tuerca, la cabeza del tornillo, el cuerpo del tornillo y la arandela dando como resultado las siguientes dimensiones (tabla 4.1).


Métrica	Tuerca (mm)			Cabeza tornillo (mm)		Cuerpo tornillo (mm)		Arandela (mm)	
				Diámetro	Altura	Diámetro	Altura	Diámetro	Altura
M1.6	3.20	3.61	1.29	2.90	1.50	1.52	10	3.37	0.34
M2	3.90	4.43	1.41	3.65	1.95	1.93	6,8,10,12,20	4.83	0.44
M2.5	4.95	5.59	1.85	4.58	2.39	2.39	12	6.15	0.47
M3	6.27	7.11	2.18	5.38	2.94	2.92	20	6.81	0.55
M4	6.86	7.76	3.04	7.07	4.00	3.78	12,16	8.68	0.72
4-40 UNC-2B	6.27	7.14	2.31	4.54	2.70	2.80	7,12,19	x	x

Tabla 4.1. Tabla de métricas medidas con calibre.

Estas medidas han posibilitado estimar de una forma más precisa las dimensiones de la cavidad de cada una de las métricas y han facilitado el diseño software.

Con respecto a los pines de alineamiento, en este proyecto se han utilizado de dimensiones 1.6 x 8 mm que son el estándar para milimétricas y submilimétricas.

Se han realizado impresiones de dos tipos. Una ha sido imprimir la pieza en bloque, es decir, para el ensamblaje sólo es necesario preocuparse de las caras laterales, que serán las que se unirán al resto del circuito. Otra manera ha sido imprimir cada pieza en dos mitades, lo que conlleva tener que ensamblar además de las caras laterales, las dos mitades entre sí (ver Figura 4.14).

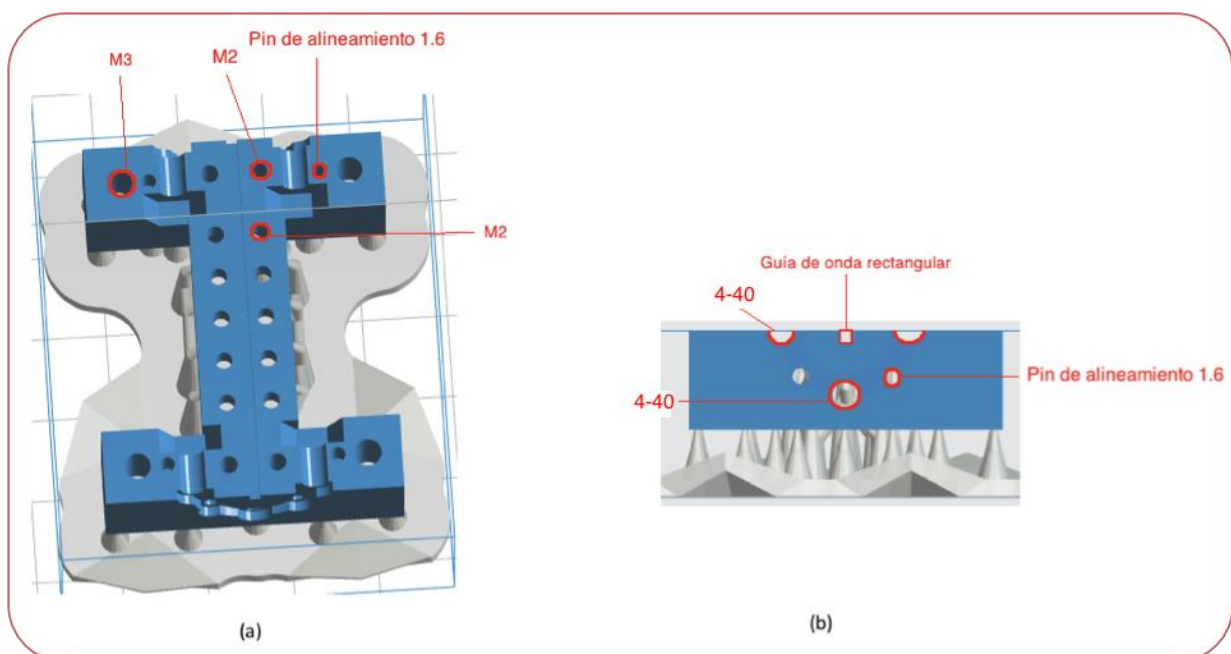


Figura 4.14. (a) Esquema de métrica de tornillo para ensamblaje en el interior de la guía; (b) Esquema de métrica de tornillo para ensamblaje en el flange de la guía.

4.7. Bibliografía

1. http://ecce.colorado.edu/~ecen5004/PDFs/Getting_Started_with_HFSSv9_for_Antenna_Design_v0.pdf



Capítulo 5. Piezas fabricadas

5.1. Introducción

Este capítulo describe todas las piezas fabricadas mediante los procedimientos explicados en el capítulo anterior.

A medida que se han ido imprimiendo las piezas, se han ido mejorando los pequeños defectos que en un principio ocasionaban problemas. En su mayoría se producían en la etapa de ensamblaje de las piezas, debido a un pequeño error de la impresora que provocaba que los tornillos de las diferentes métricas no encajasen bien.

Se han impreso varias piezas y se han ido corrigiendo los errores en las dimensiones. Aquellas que han salido bien se han metalizado, se han ensamblado y medido. También se ha utilizado como guía en los diseños el anexo sobre recomendaciones de diseño proporcionado por Formlabs y adjunto al final de este trabajo.

Durante el desarrollo del proyecto ha ocurrido un problema en la impresora 'Form1+SLA' que ha provocado una detención de las impresiones y que ha imposibilitado la realización de todas las piezas deseadas debido a que ese tiempo se ha invertido en la búsqueda de la solución del error. Es por ello que en este capítulo también se explican las pruebas de diagnóstico del problema que Formlabs ha ido solicitando.

5.2. Piezas

5.2.1. WR-10 Waveguide Single

La primera pieza en ser impresa es una guía de onda WR-10, dicha guía es una guía rectangular estándar y su banda de trabajo es de 75-110 GHz (Figura 5.1). Primeramente, se intentó seguir las recomendaciones de Formlabs con respecto a la inclinación de la pieza de 10° aproximadamente. El resultado no fue bueno puesto que el peso de la resina generaba una curvatura en la cara lateral de la guía, zona importante para una buena propagación. Se decidió entonces no poner inclinación a la pieza.

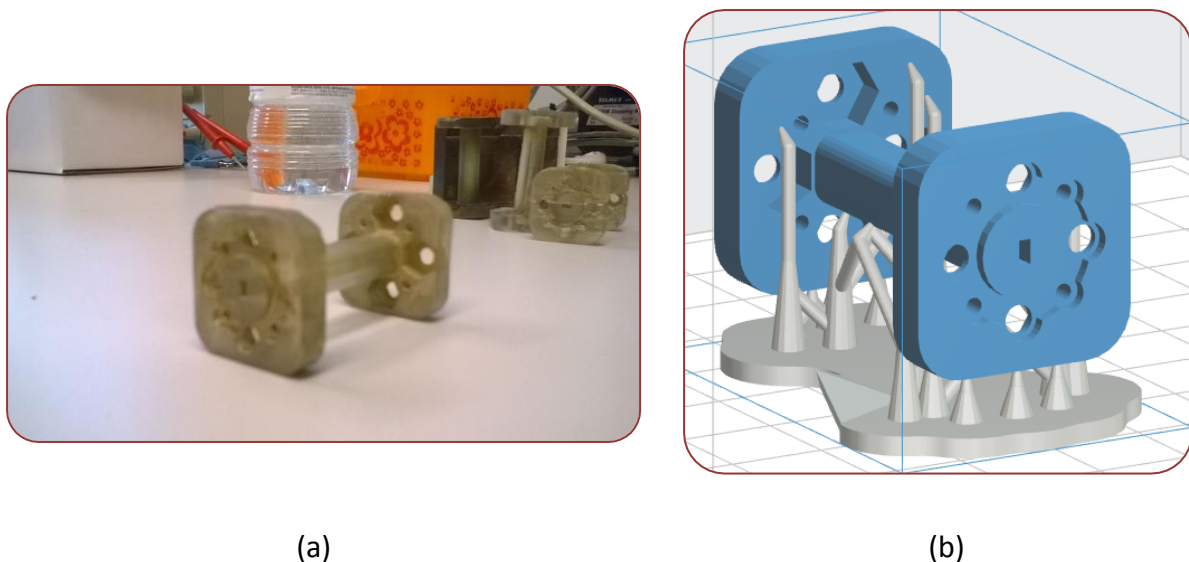


Figura 5.1. (a) Impresión de guía de onda rectangular WR-10; (b) Modelo de guía de onda rectangular WR-10.

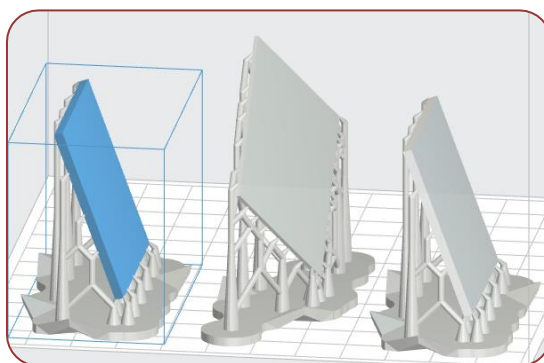
Una vez solucionado el problema de la inclinación y por tanto habiendo conseguido que los agarres (flanges) de la guía fuesen planos, el problema surgió previamente al metalizado, puesto que las tuercas del flange estaban demasiado cercanas al borde y, además, los pines de alineamiento no encajaban. Se volvió a imprimir otra pieza con una modificación para poder introducir los pines de 1.6 mm de diámetro, se pasó de 1.7 mm a 1.75 mm y se realizó una separación mayor entre el hueco de la tuerca y el borde.

Sin embargo, una vez superada la fabricación el gran inconveniente de estas piezas impresas en bloque es la incapacidad de la técnica de metalizado con sputtering para lograr un metalizado uniforme en el interior de la guía, ya que al ser ésta de unas dimensiones muy pequeñas (1.54 x1.27 mm) el metal no consigue bañar las paredes internas uniformemente y por tanto la propagación es prácticamente nula. Este es un problema que se debe investigar más a fondo para resolverlo, puesto que otros lo han conseguido.

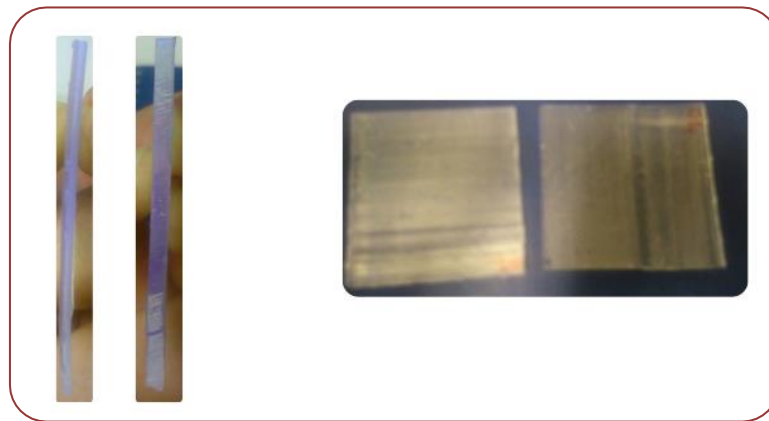
5.2.2. Figuras para medida de ϵ relativo de la resina

En este apartado vamos a tratar sobre el diseño y los resultados de varias piezas para evaluar las propiedades eléctricas de la resina CLEAR 01 que se utilizó en un principio para la impresión. Después se cambió a la CLEAR 02, que resultó tener unas propiedades muy eléctricas similares a la versión anterior.

Se imprimieron unas láminas cuadradas, de 1mm y 2 mm de grosor (ver Figura 5.2). En este caso, la inclinación de la pieza fue la óptima (10° aproximadamente) puesto que la cantidad de resina por cada pieza no era grande, por lo que el efecto de la gravedad influía en menor medida que en la anterior pieza y no provocaba la curvatura de la misma. Los soportes se repartieron por todo el perímetro de la pieza, evitando así colocar los soportes en el medio de la pieza, que podría provocar una distorsión en la medida. Además, este componente no requería de metalización puesto que para la medida era necesario que tuviese la resina al descubierto ya que se trataba de extraer sus propiedades eléctricas a la propagación de una onda electromagnética de alta frecuencia por su interior.



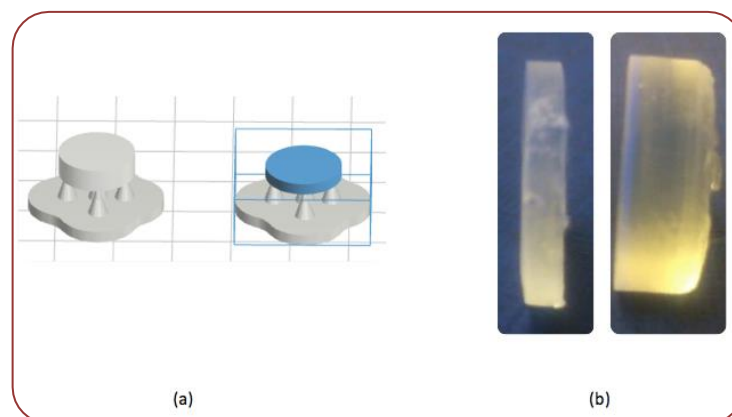
(a)



(b)

Figura 5.2. (a) Diseño 3D con PreForm 1.8.2.; (b) Piezas impresas con Form1+SLA de 1mm y 2mm de grosor.

También se imprimieron piezas cilíndricas de 1 mm y 2 mm como puede observarse en la Figura 5.3.



(a)

(b)

Figura 5.3. (a).Diseño de cilindros 1 y 2 mm. (b) Cilindros impresos de 1 y 2mm.

En ambos casos las piezas salieron con imperfecciones, que con el lijado posterior consiguieron salvarse para que la medida de la ϵ relativa fuese óptima.

La resina Clear (en ambas versiones, 01 y 02) resultó tener una ϵ de 2.7 (parte real) como aparece reflejado en la figura 5.4 y unas pérdidas inferiores a 0.03 ($\tan \delta$) a 1 THz, ver figura 5.5. Este resultado de pérdidas relativamente bajas hace que podamos plantearnos el construir componentes como una lente con dicha resina.

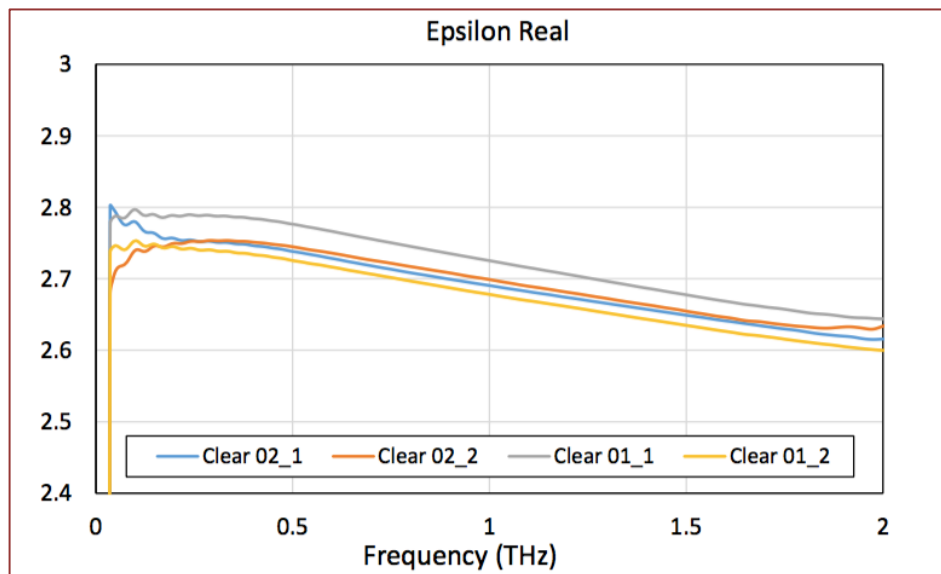


Figura 5.4. Medida de ϵ real de resinas Clear 01 y Clear 02.

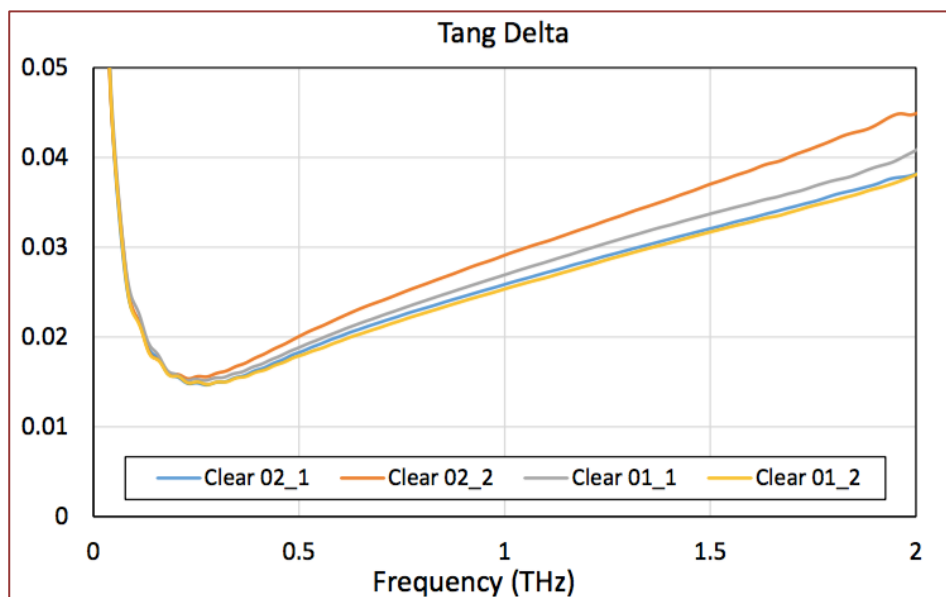


Figura 5.5. Medida de $\tan \delta$ [10].

5.2.3. WR-10 Waveguide Split

La figura 5.6 representa una guía de onda rectangular WR-10, trabajando entre 75-110 GHz. Las dimensiones de la guía son de 1.27x1.54 mm. Al principio surgieron problemas con el tamaño de las cavidades de los pines de alineamiento y de los situados en el flange. Estos

problemas se fueron solucionando dando lugar a la pieza representada en la figura 5.4. Esta pieza se consideró apta para el ensamblaje y se realizaron las medidas oportunas que se detallarán en el capítulo 6.

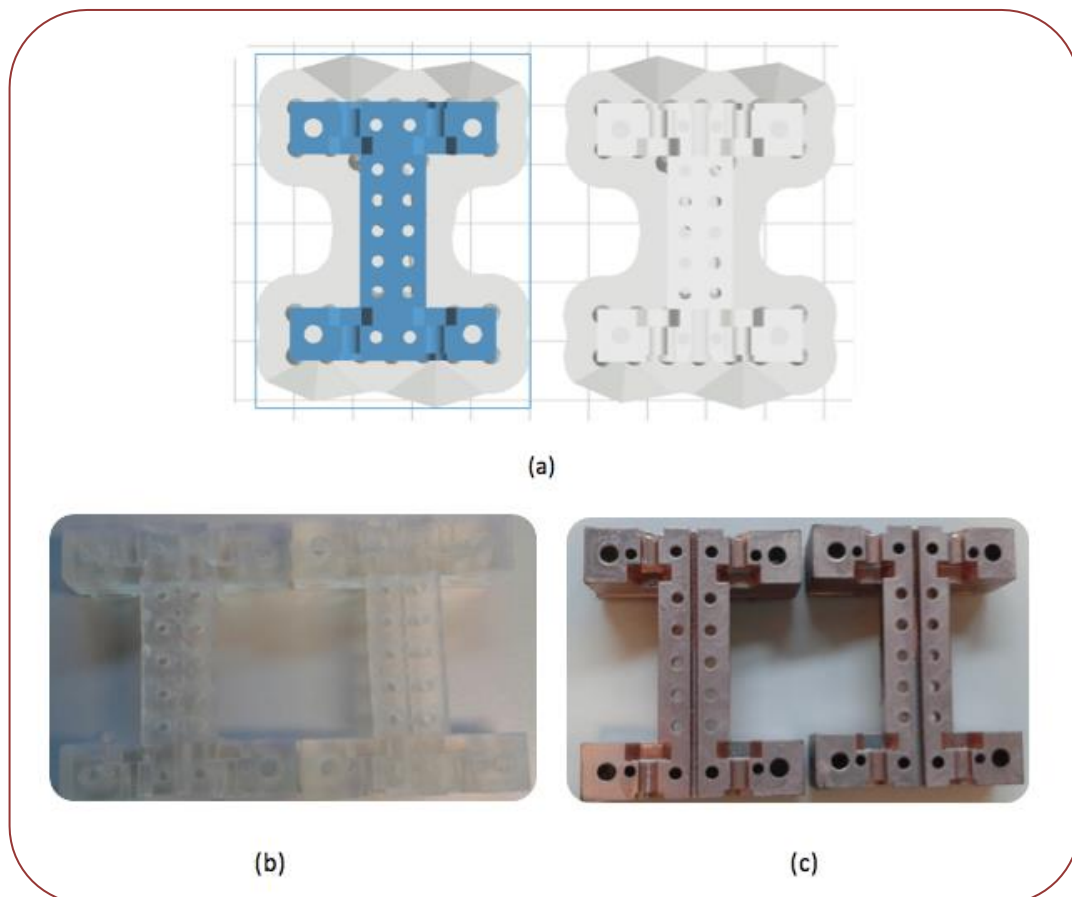


Figura 5.4. (a) Modelo 3D WR-10 waveguide; (b) WR-10 waveguide sin metalizar; (c) 'WR-10 waveguide. metalizada

El resultado del montaje es el que se representa en la figura 5.5.



Figura 5.5. WR-10 Waveguide ensamblada.

5.2.4. Fishnet Lens Horn Antenna

La pieza mostrada en la figura 5.6 es un componente de frecuencia ligeramente más baja que en los demás casos de este proyecto. La frecuencia óptima de trabajo de este componente se encuentra en torno a 53 GHz.

La dificultad en la impresión de la pieza se encontraba en los raíles donde debían colocarse dos láminas metálicas. Si existía alguna viruta o resto de resina, las láminas no encajarían bien y los agujeros de las mismas, quedarían desalineados produciendo pérdidas adicionales en la transmisión. La pieza llegó a ensamblarse (ver Figura 5.7) y medirse, pero sus resultados no fueron buenos.

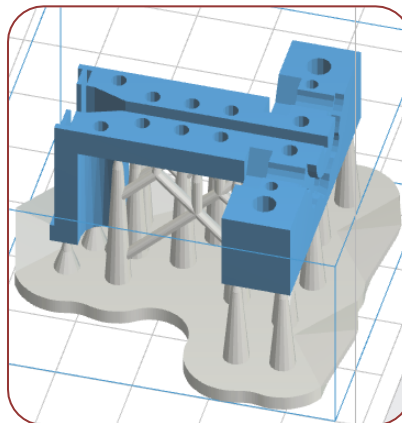


Figura 5.6. Modelo 3D Fishnet Lens Horn Antenna.



Figura 5.7. Fishnet Lens Horn Antenna ensamblada.

5.2.5. Tilted Angle Bull's Eye

La Tilted angle bull's eye antenna trabaja también en la banda 75-110 GHz, se alimenta vía una guía rectangular estándar WR-10. Esta antenna se fabricó en dos mitades y pretende ofrecer alta directividad con un diseño muy compacto. En las figuras 5.8 y 5.9 pueden verse el diseño y el resultado de la antenna respectivamente.

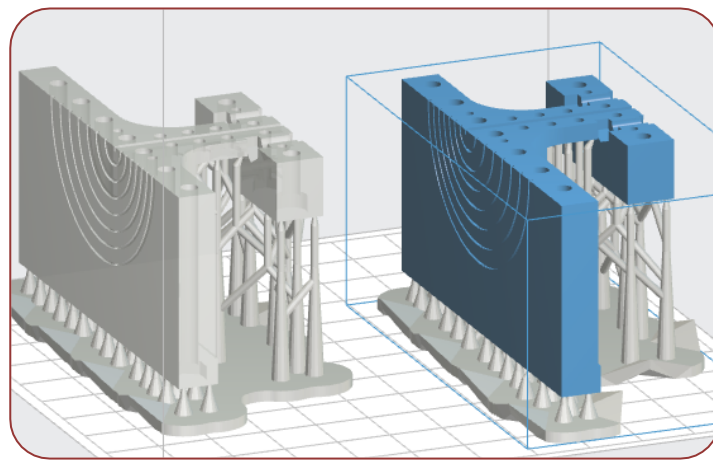
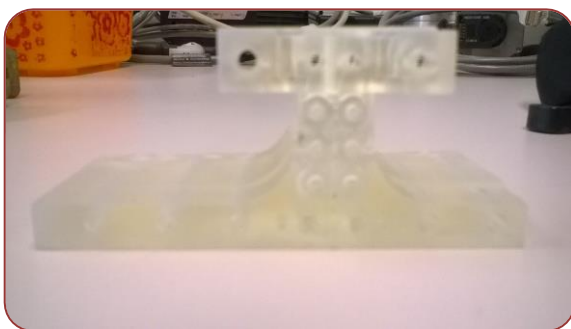
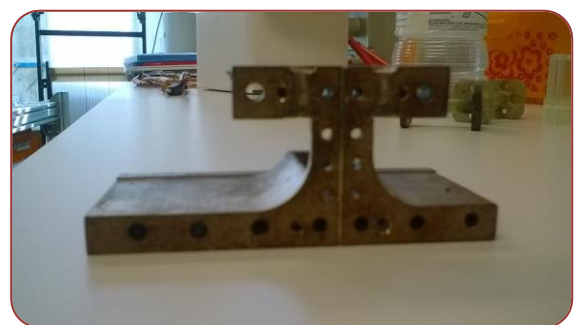


Figura 5.8. Modelo 3D de antenna Tilted Angle Bull's Eye.



(a)



(b)

Figura 5.9. (a) Mitad de Tilted Angle Bull's Eye en resina; (b) Mitad de Tilted Angle Bull's Eye metalizada.

5.2.6. Lentes

Esta lente se imprimió para después ser parte de un sistema de medida formado por una bocina y una lente. Se trata de una lente semiesférica con un raíl central para encajar la bocina (Figura 5.10). Era importante la colocación de los soportes, puesto que su extracción resultaría complicada por ser una pieza de dimensiones reducidas. El resultado de la impresión fue bueno y se consiguió realizar la medida que se explicará de forma más concreta en el capítulo 6.



Figura 5.10. Lente.

Sin embargo, el resultado de la medida utilizando esta lente no fue bueno ya que presentaba bastantes pérdidas, así que se imprimió una lente de Fresnel para compensar algunas de las pérdidas de la lente. Este hecho se explicará en profundidad en el capítulo 6.

5.2.7. Diseños no impresos

5.2.7.1. Acoplador direccional

Uno de los diseños que se quedaron pendientes de imprimir fue un acoplador direccional de 10 dB (ver Figura 5.11), que trabaja nuevamente en la banda de 75-110 GHz. El diseño se basó en uno existente, que es el que se muestra en la figura 5.12 el cual es un acoplador direccional metálico de 10 dB de acoplo y una sola rama en la banda 90-140 GHz.

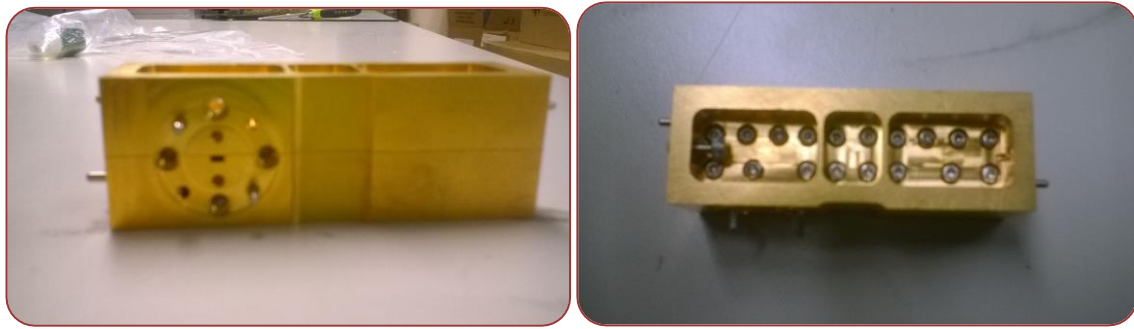


Figura 5.11. Acoplador direccional banda 90-140 GHz.

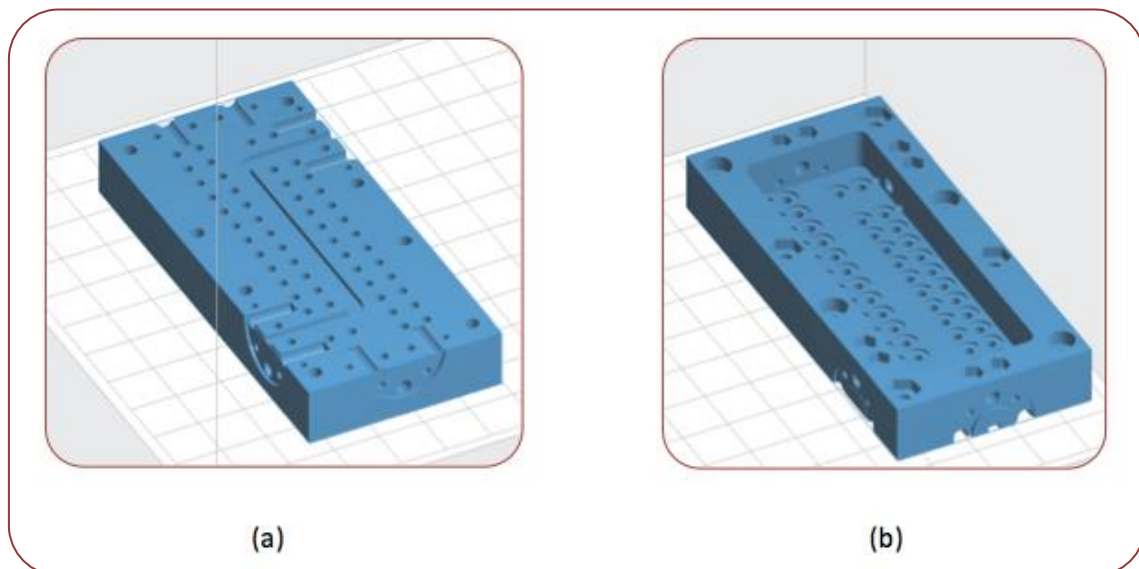


Figura 5.12. (a) Diseño 3D de acoplador mitad inferior ;(b) Diseño 3D de acoplador mitad superior.

Para su diseño se dejó un margen de 0.1 mm en cada uno de los tornillos y se tuvo en cuenta que la zona que mejor sujeción debía llevar era la de los flanges y la guía. Por ello, se reforzaron esas zonas.

5.2.7.2. Medida error de la impresora

Otro diseño que ha quedado pendiente de imprimir ha sido una pieza de prueba de error de la impresora, que se pretendió realizar con el fin de concluir cuál era el margen que debía dejarse en las cavidades de cada una de las métricas. De este modo se podría reducir el

pequeño error de las impresiones. Se diseñó una pieza que disponía de un barrido de diferentes diámetros para dar con el adecuado para cada caso.

5.3. Problemas de la impresora y posibles soluciones

Durante el desarrollo del Trabajo Fin Grado, la impresora Form1+ SLA ha dejado de funcionar correctamente. Los síntomas se veían claramente reflejados en las piezas impresas. Si las piezas eran pequeñas, es decir, la cantidad de resina empleada no era abundante, la pieza aparecía partida y la parte no impresa se quedaba sumergida en la resina del tanque y tan sólo las bases de las piezas se imprimían en la build platform. Sin embargo, si las piezas eran grandes, y por tanto la cantidad de resina era grande se solidificaba en el tanque y la build platform era incapaz de subir a la posición inicial con la pieza construida (Figura 5.13). Esto dio lugar a considerar varias opciones y a dedicar el tiempo restante del proyecto a intentar solucionar el problema.

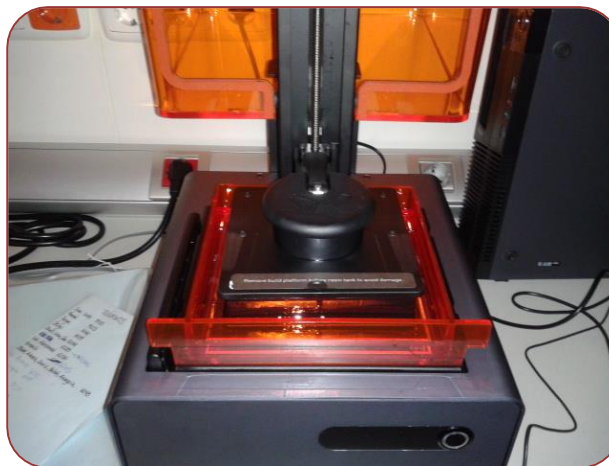


Figura 5.13. Build platform pegada al tanque de resina.

Se contactó con el servicio técnico de Formlabs que sugirió varios posibles diagnósticos y pasos a seguir con el fin de comprobar y encontrar la solución al problema.



5.3.7. Pruebas de diagnóstico

5.3.7.1. Cambio del tanque de resina

Para el correcto funcionamiento de la impresora es muy importante mantener la base del tanque de resina libre de cualquier marca de suciedad, puesto que es en esa zona donde el haz del láser incide por última vez para imprimir en la build platform. Si existe algún tipo de partícula en la base, puede provocar un desvío del haz y por tanto una imperfección en la pieza impresa.

Se decidió cambiar éste para comprobar si el problema residía en él. Se volvió a imprimir una pieza pero el resultado fue nuevamente erróneo, por lo que se descartó que el problema estuviera relacionado con el tanque.

5.3.7.2. Limpieza del large mirror

Del mismo modo que se considera imprescindible la limpieza del tanque de resina, es igualmente importante el mantenimiento del large mirror.

El siguiente paso que se siguió fue comprobar la no existencia de partículas de polvo en el mismo. Para ello se retiró el tanque de resina momentáneamente para acceder al espejo. Se aplicó luz LED y se observaron motas de polvo. En la sala limpia no se genera polvo, pero debido a que anteriormente la impresora no se encontraba en dicha sala, el espejo tenía polvo. Para limpiarlo, se siguieron los siguientes pasos recomendados por el servicio técnico de Formlabs:

1. Se aplica aire comprimido para eliminar la mayor cantidad de partículas de polvo posible. En este caso se aplicó nitrógeno, gas que es mucho más puro y no transporta humedad.
2. Con una toallita PEC-PAD dividida en 4 partes. Se pasa la toallita ejerciendo una ligera presión, tal y como se ve en la figura 5.14.



Figura 5.14. Limpieza del espejo.

3. Se impregna otra toallita con IPA y se realiza el movimiento en dirección opuesta al anterior paso. Cada pasada se hace de unos 20-30 segundos.
4. Se vuelve a pasar una toallita seca con el fin de eliminar las huellas.
5. Se comprueba nuevamente con luz LED que las motas han desaparecido. Si no lo han hecho, se repite el proceso hasta conseguirlo.

Una vez se limpió el espejo, se probó a imprimir unas piezas que Formlabs envió para testear las impresiones (Figura 5.15) y nuevamente las piezas no se imprimieron correctamente como puede comprobarse en la Figura 5.16. En un principio se debían imprimir varias réplicas de diferentes tamaños, pero se decidió realizar una sola para no arriesgar la pérdida de otro tanque de resina.

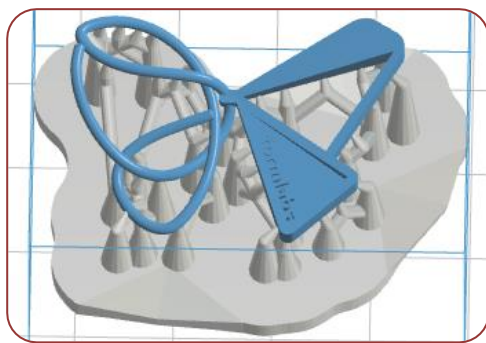


Figura 5.15. Diseño test de impresión.



Figura 5.16. Resultado test de impresión.

La conclusión que se extrajo en este caso fue que el espejo no era el motivo por el que la impresora no funcionaba.

5.3.2.3. Comprobación de la alineación del gancho

Como último chequeo de la impresora se pidió comprobar el gancho interno de la base del tanque. Debía estar alineado con el agujero (Figura 5.17.b). Se comprobó esto último pero fue complicada su comprobación por lo que el servicio técnico de Formlabs decidió que les mandásemos la impresora a reparar puesto que ésta se encontraba en garantía.

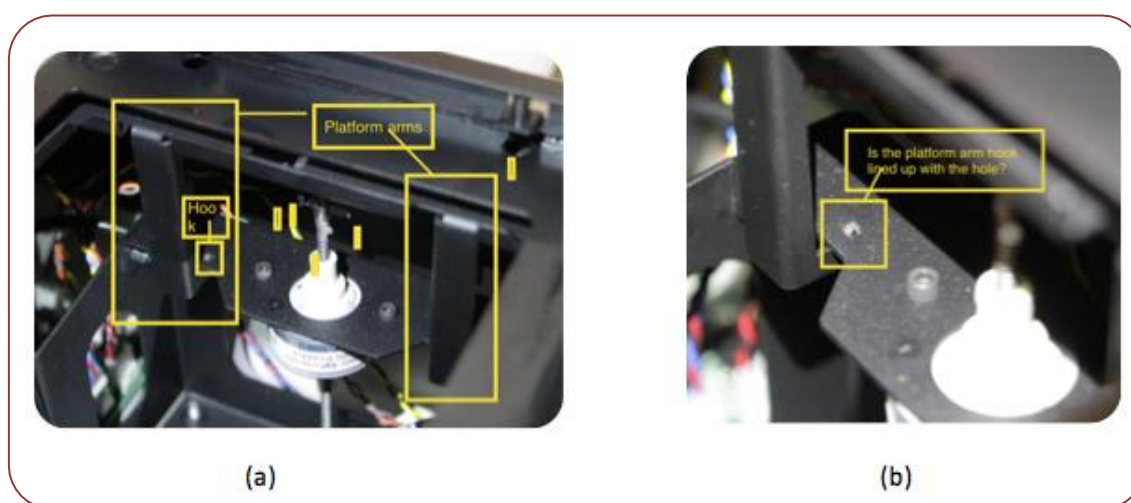


Figura 5.17. (a) Gancho; (b) Agujero alineado con el gancho.

5.3.8. Problema y solución

Finalmente el problema de la impresora se encontró en uno de los espejos internos de la impresora. Presentaba un arañazo y tuvo que ser sustituido. Además se cambiaron los galvos de la impresora puesto que estaban defectuosos.

Todo ello provocaba una menor potencia de emisión del láser y que por tanto, las piezas no se imprimiesen por completo.

Se volvió a imprimir una pieza y se comprobó que la solución al problema de la adhesión de la plataforma al tanque ya no existía, pero las piezas no salían del todo bien. Éstas sufrían una distorsión en las cavidades preparadas para los tornillos, de modo que para insertarlos era necesaria la ampliación manual (que provocaba el ensamblaje un proceso tedioso y



costoso). Finalmente se ajustó un tornillo de la build platform para fijarla, ya que esta se movía mientras la impresora trabajaba y con esto parece que el problema de impresión está solucionado.

5.4. Bibliografía

1. <http://www.swissto12.com/>



Capítulo 6. Resultados de medidas y análisis

6.1. Introducción

Este capítulo está dedicado a la descripción de los resultados y análisis de los componentes que se han conseguido fabricar y medir.

Cabe destacar que debido al problema ocasionado en la impresora no han podido ser todos los deseados.

Se describirán las medidas realizadas en el sistema de bocina y lente, así como Fishnet Lens Horn Antenna y el realizado en la medida de la guía rectangular WR-10.

6.2. Resultados y análisis

6.2.1. Lentes

Para la medida del sistema de bocina y lente se utilizó el posicionador situado en el laboratorio de THz de Anteral S.L., junto con cabezales en la banda de 75-110 GHz, tal y como aparece representado en la figura 6.1. Mediante software se obtuvieron los resultados (ver Figura X) de directividad.

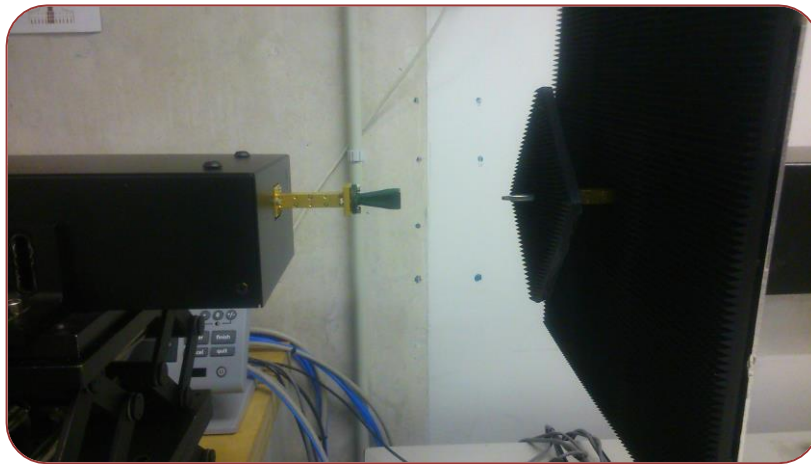


Figura 6.1. Medida de Lens Horn Antenna.

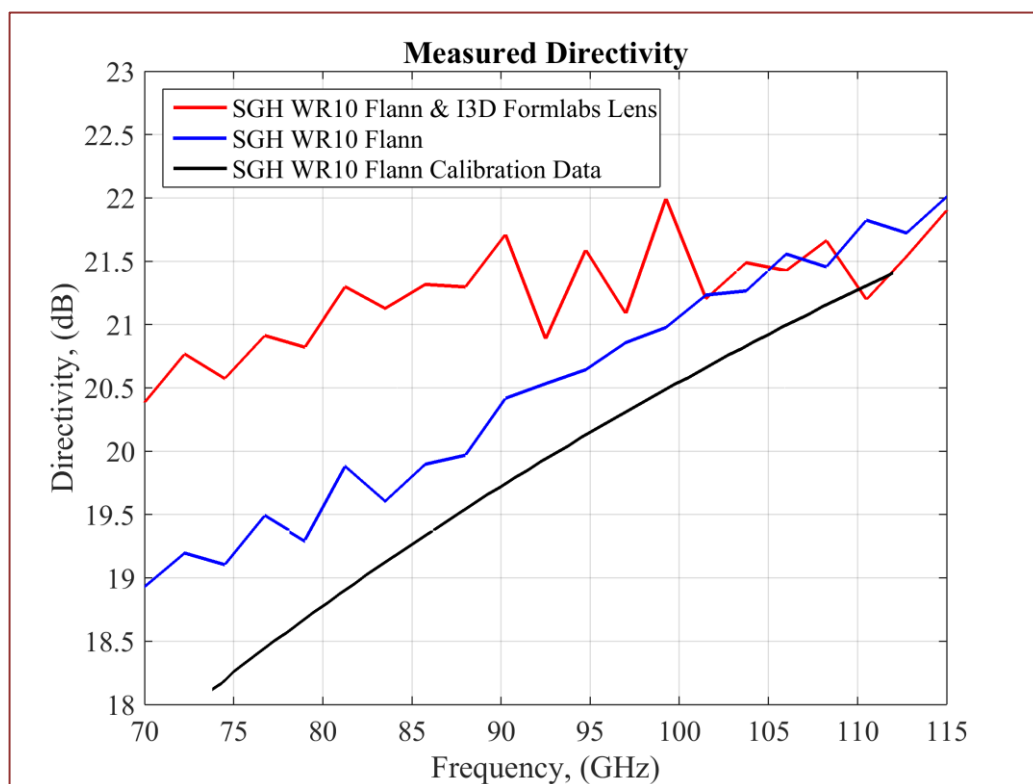


Figura 6.2. Comparación de WR-10 con lente (roja) y sin lente (azul).

En el gráfico se observa que al realizar la medida con la lente existe un aumento de la directividad con respecto a la bocina sin lente, puesto que ésta logra confinar el haz. Sin embargo, la ganancia es menor (18 dB con respecto a los 20 dB de inicio), lo que indica que



existen pérdidas debido al cambio de medio que se produce entre el aire y la lente y, sobre todo, por el hecho de la propagación del haz por el interior de la lente debido a las pérdidas dieléctricas asociadas al material utilizado (resina Clear 02).

Los resultados de adaptación son peores que en el caso de no poner lente pero se pueden considerar aceptables.

Por estos motivos se decide fabricar una lente de Fresnel, la cual reducirá el volumen de propagación por la lente debido a que es más fina. Por ello, disminuirán las pérdidas por la propagación por el material. De esta forma, si las pérdidas se ven muy reducidas, se podrá comprobar que las mayores pérdidas se dan por el material y no por el cambio de medio.

6.2.2. WR-10 Waveguide Split.

Para la medida de esta guía se utilizan dos transceptores WR-10 entre los cuales se colocará la misma. Para poder comprobar si la propagación es correcta se mide el parámetro S_{21} .

En este caso la medida fue errónea puesto que se observaban pérdidas de aproximadamente 40 dB cuando realmente se esperaban de 1 dB, posiblemente por algo de desalineamiento en la guía. El error podría estar en el metalizado por lo que debería investigarse sobre mejorar el mismo.



Capítulo 7. Conclusiones

En este capítulo se resumen las conclusiones que se han ido extrayendo durante este trabajo de investigación.

En primer lugar es necesario comentar que debido al problema de la impresora ya comentado en el capítulo 5, las piezas impresas inicialmente no eran del todo correctas puesto que sufrían una distorsión en las cavidades preparadas para los tornillos. La conclusión que se extrajo en ese momento fue que la impresora cometía un pequeño error en las impresiones y por lo tanto se supuso que habría que dejar un margen de error cuando se diseñaba la pieza, por ejemplo ampliando el diámetro de los pines de alineamiento.

Las siguientes piezas seguían cometiendo dicha distorsión pero afectaba en menor medida puesto que aplicando el margen, el error se suavizaba. Otro síntoma de fallo de la impresora fue la inestabilidad en la impresión, es decir, alguna pieza salía bien (sin olvidarnos de la distorsión) pero otras partidas.

Después de arreglar la impresora por completo, las piezas ya no padecían dicha distorsión y el ensamblaje resultaba más sencillo.

Debido a los imprevistos ocurridos a lo largo de este trabajo de investigación, parte del tiempo que debía dedicarse a la medida de los componentes metalizados, se ha dedicado a encontrar la solución del error.

Puede decirse que la impresora tiene un error muy pequeño en condiciones normales de funcionamiento, pero en este proyecto no se ha podido llegar a medir ninguna pieza con la impresora en dichas condiciones.



Conforme avance la investigación y se mejore la técnica de fabricación, en especial en la etapa de metalizado, la conclusión es que se podrán fabricar los componentes y se podrán abaratar los costes de fabricación de los mismos.



Capítulo 8. Futuro de la impresión en 3D

En la actualidad, las impresoras 3D se han convertido en herramientas cotidianas dentro de un ambiente empresarial. Resultan una herramienta esencial sobretodo en el mundo de la odontología, medicina, arquitectura, ingeniería e incluso en el mundo culinario. Se puede decir que son versátiles en cuanto a aplicaciones.

Se estima que las impresoras 3D van a suponer una revolución industrial conforme las técnicas de impresión y los materiales vayan evolucionando. Los mayores cambios se darán en el sector médico, aeroespacial, arquitectura y sector culinario.

- **Arquitectura:**

En la actualidad existen proyectos de construcción de casas enteras. Es el caso de Janjaap Ruijssenaars, arquitecto holandés, , que lo está poniendo en práctica. Intenta construir un edificio entero mediante impresora 3D.

- **Medicina:**

Gracias al desarrollo de los materiales biocompatibles, que darán la posibilidad de fabricar órganos aceptados por los humanos, éstos podrán imprimirse y podrían llegar a realizar trasplantes de una forma más rápida. Esto realmente supondría un avance médico a gran escala.

- **Mundo culinario:**

Actualmente ya se han hecho experimentos en restaurantes de alta cocina en los que parte del menú ha sido realizado por una impresora 3D. Por este motivo se prevé que este cambio pueda darse también en las cocinas.



- **Aeroespacial:**

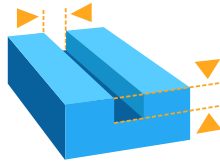
Para solucionar la avería de una nave se necesita enviar una pieza de repuesto, lo que supone un gasto elevado. Por ello, la NASA y la ESA investigan la posibilidad de llevar al espacio una impresora 3D con el fin de poder imprimir las piezas con ella y evitar el envío de piezas de repuesto. La NASA ya ha probado a hacerlo y la ESA pretende realizarlo en 2016. Por tanto, la aplicación de esta tecnología supondrá un ahorro y además se implementará a corto plazo puesto que ya se ha mandado una impresora a la Estación Espacial Internacional.

Todos los campos de aplicación de esta tecnología inducen a pensar que en un futuro no muy lejano la impresión 3D se convertirá en un elemento cotidiano. Los sectores de aplicación son punteros en investigación y promoverán un impulso en la misma, tanto de materiales como de nuevas técnicas, que facilitarán su uso e incluso permitirán ampliar su aplicación a nuevos sectores.

8.1. Bibliografía

1. <http://www.xataka.com/makers/tres-usos-que-daremos-a-las-impresoras-3d>

Anexo. Recomendaciones de diseño de Formlabs Inc.



MINIMUM ENGRAVED DETAIL

Recommended: 0.4 mm

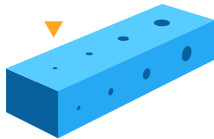
Engraved details are imprinted or recessed features on your model. Details recessed less than 0.4 mm in thickness and in height may not be visible because they will be fused with the rest of the model during the print process.



MINIMUM CLEARANCE

Recommended: 0.5 mm

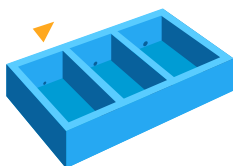
Clearance is the amount of distance needed between two moving parts of a model (e.g., the distance between gears or joints). A clearance of less than 0.5 mm may cause parts to fuse.



MINIMUM HOLE DIAMETER

Recommended: 0.5 mm

Holes with a diameter less than 0.5 mm in the x, y, and z axes may close off during printing.



MINIMUM DRAIN HOLE DIAMETER

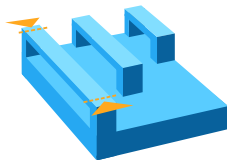
Recommended: 3.5 mm diameter

Drain holes are recommended for resin to escape in models that are a fully enclosed cavity (like a hollow sphere or hollow cylinder printed directly on the build platform). Without drain holes of at least 3.5 mm in diameter, the part may trap resin and lead to an **explosion of the print**.

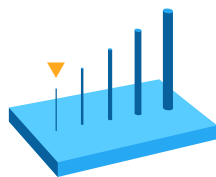
If you have any questions about the specific feature sizes of your model, you can post in our [community forum](#) or contact us at support@formlabs.com.

**MINIMUM UNSUPPORTED OVERHANG ANGLE****Recommended: 19° from level** (35 mm long × 10 mm wide × 3 mm thick)

The overhang angle refers to the angle from horizontal that the overhang sticks out. Printing at an angle less than 19° could cause the overhang to break off the model during the peel process. Rotate your part so flat surfaces can be held up by supports if they are not already self-supporting. See the "Print Flat Surfaces at an Angle" section of our [Model Orientation](#) article.

**MAXIMUM HORIZONTAL SUPPORT SPAN/BRIDGE****Recommended: 21 mm** (5 mm width × 3 mm thick)

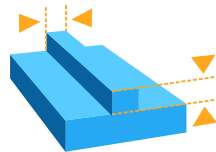
A span is the distance between two intermediate supports of a structure. While printing horizontal spans is discouraged, certain geometries print well. For a 5 mm wide and 3 mm thick beam, spans longer than 21 mm are likely to fail. Wider beams must be kept shorter to avoid breaking during the peeling process.

**MINIMUM VERTICAL-WIRE DIAMETER****Recommended: 0.3 mm** (7 mm tall) **to 1.5 mm** (30 mm tall)

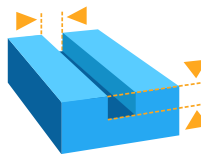
A wire is a feature whose length is greater than two times its width. The ratio is key to printing wires; at 0.3 mm thickness you can print up to 7 mm tall before you start to see waving. 1.5 mm wires can get up to 30 mm tall without defects.

Note: Washing Small Wires

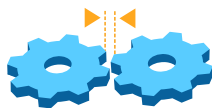
Similar to washing thin walls, extra care should be taken when washing small wires, as they are weakened by IPA and can easily be damaged. Minimizing the time the part is immersed in IPA will limit this effect.

**MINIMUM EMBOSSED DETAIL****Recommended: 0.1 mm**

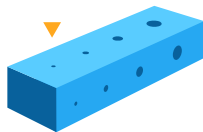
Embossed details are shallow raised features on your model, such as text. Details smaller than 0.1 mm in thickness and in height may not be visible on your print.

**MINIMUM ENGRAVED DETAIL****Recommended: 0.4 mm**

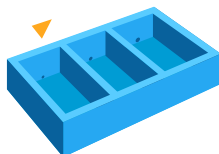
Engraved details are imprinted or recessed features on your model. Details recessed less than 0.4 mm in thickness and in height may not be visible because they will be fused with the rest of the model during the print process.

**MINIMUM CLEARANCE****Recommended: 0.5 mm**

Clearance is the amount of distance needed between two moving parts of a model (e.g., the distance between gears or joints). A clearance of less than 0.5 mm may cause parts to fuse.

**MINIMUM HOLE DIAMETER****Recommended: 0.5 mm**

Holes with a diameter less than 0.5 mm in the x, y, and z axes may close off during printing.

**MINIMUM DRAIN HOLE DIAMETER****Recommended: 3.5 mm diameter**

Drain holes are recommended for resin to escape in models that are a fully enclosed cavity (like a hollow sphere or hollow cylinder printed directly on the build platform). Without drain holes of at least 3.5 mm in diameter, the part may trap resin and lead to an **explosion of the print**.

If you have any questions about the specific feature sizes of your model, you can post in our [community forum](#) or contact us at support@formlabs.com.